

# 光学学报

## 基于透明陶瓷材料的激光研究进展

王飞<sup>1,3</sup>, 彭跃峰<sup>2,3</sup>, 唐定远<sup>2</sup>, 沈德元<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>江苏师范大学江苏省先进激光技术与新兴产业协同创新中心, 江苏 徐州 221116;

<sup>2</sup>江苏师范大学江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116;

<sup>3</sup>江苏中红外激光应用技术产业研究院, 江苏 徐州 221000

**摘要** 陶瓷激光器是一种以透明陶瓷材料作为增益介质的激光器。与单晶相比,透明陶瓷具有制备周期短和烧结温度低等优势,在激活离子高掺杂浓度下能保证良好的光学均匀性,且容易制备成各种大尺寸复合结构。近年在高功率和超短超强激光输出方面得到广泛应用,产生了一系列研究成果。回顾了陶瓷激光器的发展历程,总结了透明陶瓷在高功率、超短超强脉冲激光输出和特殊波长激光输出等方面的最新进展,并阐述了基于陶瓷制备优势的新型激光材料的发展趋势。

**关键词** 材料; 陶瓷激光; 倍半氧化物; 复合结构; 中红外激光; 高功率

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0116001

## Research Progress on Lasers Based on Transparent Ceramic Materials

Wang Fei<sup>1,3</sup>, Peng Yuefeng<sup>2,3</sup>, Tang Dingyuan<sup>2</sup>, Shen Deyuan<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>*Jiangsu Collaborative Innovation Center of Advanced Laser Technology and Emerging Industry, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;*

<sup>2</sup>*Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;*

<sup>3</sup>*Jiangsu Institute of Mid Infrared Laser Applied Technology, Xuzhou, Jiangsu 221000, China*

**Abstract** A ceramic laser is one using transparent ceramic materials as its gain media. Compared with single crystals, transparent ceramics have the advantages such as short preparation cycle and low sintering temperature. They possess good optical uniformity under high doping concentration of active ions and are easily developed into various large size composite structures. In recent years, ceramic lasers have made a rapid progress in high power as well as ultra-short and ultra-strong laser operation, and have induced a series of achievements. In this paper, the development progress of ceramic lasers is reviewed and the latest developments of transparent ceramics in high power, ultra-short pulsed laser operation and laser output with special wavelengths are summarized. In addition, the development trend of novel laser materials based on the advantages of ceramic preparation is also prospected.

**Key words** materials; ceramic laser; sesquioxide; composite structure; mid-infrared laser; high power

**OCIS codes** 160.3380; 140.3460; 140.3580

### 1 引言

固体激光器广泛应用于国防、医学、工业加工及前沿科学研究等多个领域。自 1960 年第一台红宝石激光器问世以来<sup>[1]</sup>,人们一直致力于开发以单晶

和玻璃为主的高质量激光增益材料。玻璃增益介质容易制备成大尺寸,但热导率低;而通过熔融方式生长的单晶,受限于其制备方式,面临掺杂剂与基体分离、晶体生长过程中应力引起的光学不均匀、高温加工的成本高及生产率低等问题。透明陶瓷作为一种

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-08-16; 录用日期: 2020-08-26

\* E-mail: shendy@fudan.edu.cn

新型激光增益介质,近年获得了越来越广泛的关注。

“陶瓷”一词来源于希腊语 *keramos*,半透明和不透明的陶瓷经常被用作餐具,因为含有大量的散射中心(即缺陷),这样的陶瓷不适用于光学领域。20 世纪 50 年代,Coble<sup>[2]</sup>通过微观结构控制来减少气孔,从而开发出半透明的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷。1964 年,Hatch 等<sup>[3]</sup>利用  $\text{Dy}:\text{CaF}_2$  多晶陶瓷材料实现了激光振荡。各种透明陶瓷材料得到了快速发展,输出激光功率水平也得到快速提升。以  $\text{Nd}:\text{YAG}$  陶瓷材料作为激光增益介质,研究者们已经在  $1.06\ \mu\text{m}$  波段实现了  $>67\ \text{kW}$ <sup>[4]</sup> 和  $>100\ \text{kW}$ <sup>[5-6]</sup> 的激光输出。新型激光陶瓷材料以其独特的优势,已经成为继单晶和玻璃之后又一种优秀的激光介质。

透明陶瓷材料不仅具有良好的物理机械性能和光学特性,还具有强大的制备优势,其容易制备成大尺寸复合结构,为高功率、大能量激光技术的发展提供了新的契机,也为激光系统设计提供了更大的自由度。本文首先回顾了陶瓷激光器的起源和发展历程,然后介绍了透明陶瓷材料在固体激光技术方面的应用和取得的成就,最后对陶瓷激光器的未来进行了展望。

## 2 陶瓷激光器的发展历程

1959 年,Coble 制备出半透明的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷<sup>[2]</sup>,使得陶瓷材料向光学应用迈出了重要一步。此后,研究者们对透明陶瓷进行了相关研究。初期制作的陶瓷中存在大量的散射源(或称散射点),如

晶界、残余气孔、第二相、双折射、杂质和粗糙表面等,因此其散射损耗大且光学质量较差,难以作为激光增益介质。随着陶瓷制备工艺的改进,其光学特性得到逐渐提升。1964 年,Hatch 等<sup>[3]</sup>首次尝试将陶瓷材料作为增益介质并应用于激光器中,在低温条件下利用闪光灯泵浦  $\text{Dy}:\text{CaF}_2$  陶瓷获得了激光发射。位于陶瓷晶界处的  $\text{CaO}$  散射中心使陶瓷在可见光波段的散射损耗高达 2%,这限制了激光输出性能。1973 年,Greskovich 等<sup>[7]</sup>首次在氧化物陶瓷中获得了激光输出,利用闪光灯泵浦掺杂了 1% (原子数分数)  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  的氧化钇,激光斜效率仅为 0.1%。直到 1995 年,Ikesue 等<sup>[8]</sup>通过改进陶瓷制备工艺,获得了高光学质量的  $\text{Nd}:\text{YAG}$  陶瓷,并以半导体激光作为泵浦源,在  $1.06\ \mu\text{m}$  波段实现了输出斜效率为 28% 的连续波激光,其输出斜效率与单晶的输出斜效率相当。1999 年,日本 Konoshima 公司利用纳米加工技术并结合真空烧结工艺,制备了光谱性能与单晶光谱性能几乎一致的  $\text{Nd}:\text{YAG}$  陶瓷,并成功实现了商业化。2002 年,Lu 等<sup>[9]</sup>利用 Konoshima 公司制作的  $\text{Nd}:\text{YAG}$  陶瓷棒(如图 1 所示)获得了 1.46 kW 的激光输出。陶瓷的孔隙率为  $1 \times 10^{-6}$ ,平均晶粒尺寸为  $10\ \mu\text{m}$ ,晶界宽度约为 1 nm。这是激光陶瓷的输出功率首次突破千瓦,光光转换效率达到 42%,非常接近单晶的激光输出性能,如图 2 所示,这表明透明陶瓷作为激光增益介质具有可行性。

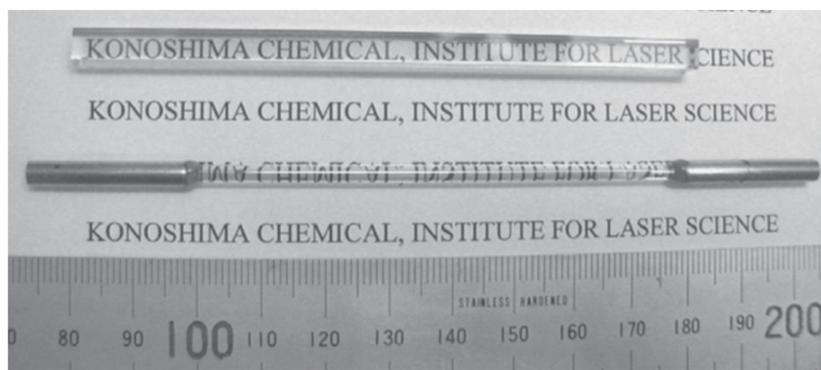


图 1 实现千瓦级激光输出的  $\text{Nd}:\text{YAG}$  陶瓷<sup>[9]</sup>

Fig. 1  $\text{Nd}:\text{YAG}$  ceramic with kW laser output<sup>[9]</sup>

2010 年,Latham 等<sup>[10]</sup>利用由厚度为  $200\ \mu\text{m}$  的  $\text{Yb}:\text{YAG}$  ( $\text{Yb}$  的原子数分数为 9%) 陶瓷薄片与厚度为 1 mm 的未掺杂  $\text{YAG}$  陶瓷端帽组成的复合结构,减轻了热负荷的影响,并利用这种复合结构陶瓷获得了 6.5 kW 激光输出。采用 Konoshima 公司生产的激光陶瓷,三个不同的研究组分别建立了输

输出功率大于  $67\ \text{kW}$ <sup>[4]</sup> 和大于 100 kW 的陶瓷激光系统<sup>[5-6]</sup>。2006 年,美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)以 5 块大尺寸( $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ )的  $\text{Nd}:\text{YAG}$  陶瓷作为增益介质,构建了固体热熔激光(SSHCL)系统(图 3),该系统在 808 nm 半导体激光泵浦下获得了 1064 nm 的激光输出,平

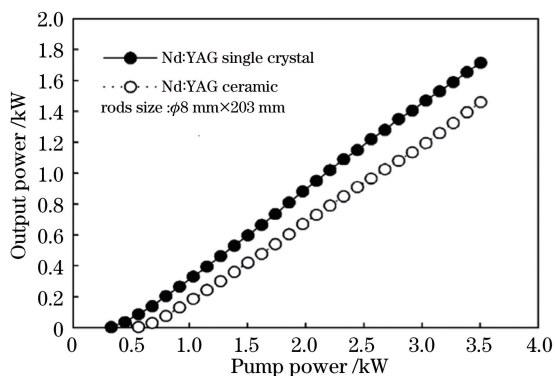


图 2 第一台输出功率突破千瓦的 Nd:YAG 陶瓷激光器的输出功率曲线<sup>[9]</sup>

Fig. 2 First Nd:YAG ceramic laser with output power exceeding kilowatt<sup>[9]</sup>

均输出功率高达 67 kW,单脉冲能量为 335 J,持续运行时间小于 1 s。2008 年,基于复合结构陶瓷的优化设计,该系统的输出激光光束质量获得了大幅度提升(达到 2 倍衍射极限),持续运行时间也提高到了 5 s<sup>[4]</sup>。2009 年,Northrop Grumman 公司建立了端泵的 Yb:YAG 薄片激光系统,获得了大于

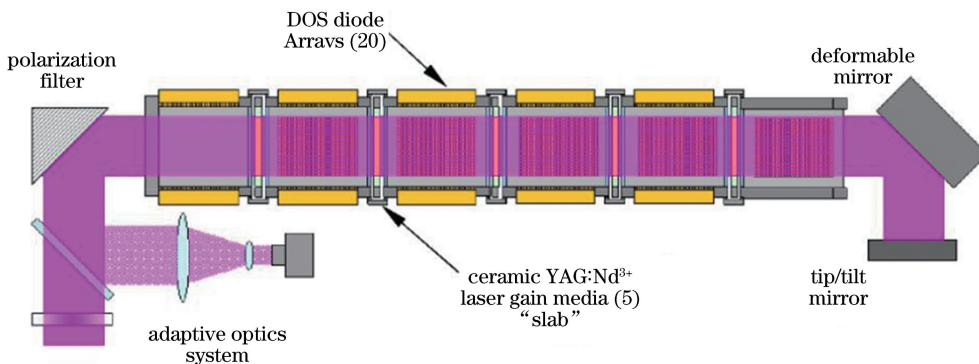


图 3 半导体激光泵浦的 SSHCL 系统的结构示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Structural diagram of SSHCL system pumped by diode laser<sup>[4]</sup>

2017 年,捷克 HiLASE 中心利用由 6 片 Cr:YAG 包边的 Yb:YAG 矩形激光陶瓷薄片(图 4),获得了平均输出功率超过 1 kW、单脉冲能量为 105 J、脉冲宽度为 10 ns 的激光<sup>[14]</sup>。

单晶介质也经常被用于高重复频率、大脉冲能量的激光系统中,但其有限的增益介质体积是制约功率提升的重要因素。例如,要制备单脉冲能量为 100 J 的纳秒激光脉冲,要求增益介质尺寸大于 5 cm,以对抗有限的激光损伤阈值<sup>[15]</sup>。得益于陶瓷制备工艺的优势,透明陶瓷能够获得单晶介质无法达到的大尺寸。因此,在实现超高功率、超短超强激光输出方面,透明陶瓷材料大有可为。

100 kW 的功率输出<sup>[5]</sup>。2010 年,Textron 公司也利用 Nd:YAG 板条陶瓷激光器实现了 100 kW 激光输出<sup>[6]</sup>。

### 3 透明陶瓷激光技术的特色和优势

#### 3.1 基于陶瓷制备工艺的脉冲激光技术

得益于制备工艺,陶瓷容易制备成大尺寸的激光增益介质,在制备超短超强激光方面具有很大优势。2006 年,Ikesue 等<sup>[11]</sup>报道了 Nd:YSAG 陶瓷锁模激光器,该激光器实现了脉冲宽度为 10 ps、平均功率为 610 mW 的激光输出。2009 年,Tokurakawa 等<sup>[12]</sup>以 Yb<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Yb<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 两种陶瓷材料作为增益介质,两种陶瓷样品在未镀膜的情况下直接接触,泵浦光以布儒斯特角入射,获得了 53 fs 的超短脉冲激光输出。日本研究者利用 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 陶瓷薄片,获得了峰值功率为 27.7 MW、脉冲能量为 13.2 mJ、脉冲宽度为 476 ps 的脉冲激光输出<sup>[13]</sup>。在大能量的纳秒级激光技术方面,陶瓷同样获得了一些令人瞩目的成果。

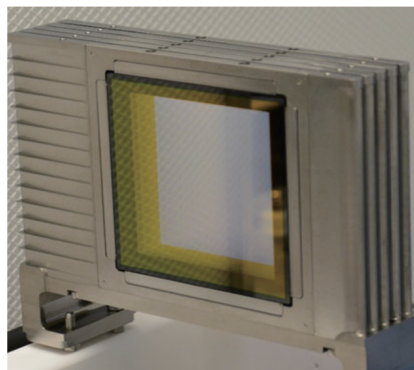


图 4 实现 105 J 单脉冲能量的 Yb:YAG 陶瓷薄片组<sup>[14]</sup>

Fig. 4 Thin Yb:YAG ceramic disk with single pulse energy of 105 J<sup>[14]</sup>

### 3.2 基于陶瓷制备优势的倍半氧化物增益介质

倍半氧化物熔点高,物化性能优异,声子能量相对较低。与 YAG 相比,倍半氧化物(Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)具有更高的热导率<sup>[16]</sup>,更适合应用于高功率激光领域<sup>[17]</sup>。倍半氧化物材料的熔点很高(>2400 °C),很难通过单晶生长工艺进行制备,但其相变点远低于熔点温度,可以通过陶瓷制备工艺在比较低的温度下(1500~1700 °C)实现倍半氧化物透明陶瓷的制备<sup>[18]</sup>。高热导率和容易制备成大体积增益介质的特点使得倍半氧化物在制备高功率和超短脉冲激光方面很有应用前景。

被动锁模的 Yb<sup>3+</sup>:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光器在 1 μm 波段获得了 357 fs 的脉冲,平均功率为 352 mW<sup>[19]</sup>。研究者以 Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷作为增益介质,也获得了平均功率为 850 mW 的 92 fs 超短脉冲激光<sup>[20]</sup>。在半导体激光泵浦的 Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷锁模激光器中,获得了 53 fs 的超短脉冲输出<sup>[12]</sup>。克尔透镜锁模的 Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷薄片激光器获得了平均功率为 3.7 W、脉冲能量为 98 fs 的激光<sup>[21]</sup>。德国 Max Born 非线性光学和短脉冲光谱研究所利用被动锁模的 Tm:(Lu<sub>2/3</sub>Sc<sub>1/3</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器,获得了波长为 2.057 μm 的 63 fs 超短脉冲激光<sup>[22]</sup>。在连续激光输出方面,倍半氧化物陶瓷也取得了一定的进展。975 nm 波长泵浦的 Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在 1080 nm 处获得了 16 W 的功率输出<sup>[23]</sup>。日本学者在 Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷薄片激光器中获得了 174 W 的连续波输出,激光斜效率为 54%<sup>[24]</sup>。

江苏师范大学课题组与南洋理工大学合作制备了多种激活离子掺杂的倍半氧化物陶瓷材料,并在高功率激光输出方面开展了大量研究。2017 年,研究者利用 Tm:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷在 2050 nm 处分别获得了 7.25 W 的连续波和 115 ns 的脉冲激光输出<sup>[25]</sup>。2019 年,研究者利用未镀膜的 Ho:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 透明陶瓷,在 1931 nm 掺 Tm 光纤激光泵浦条件下,获得了 113.6 W、2117 nm 的连续激光输出,激光斜效率达到 55.6%<sup>[26]</sup>。声光(AO)调 Q 的 Ho:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 透明陶瓷也获得了平均功率为 21 W 的 2117 nm 激光输出,重复频率为 10 kHz,峰值功率为 60 kW<sup>[27]</sup>。课题组对制备的倍半氧化物陶瓷材料进行了扫描电镜(SEM)成像,如图 5 所示,未观察到残余气孔、二次相或光学不均匀现象,说明陶瓷的散射损耗很小,具有良好的光学质量。激光输出实验也进一步证明了倍半氧化物陶瓷在高功率、高效率激光增益介质方

面的应用具有巨大潜力。

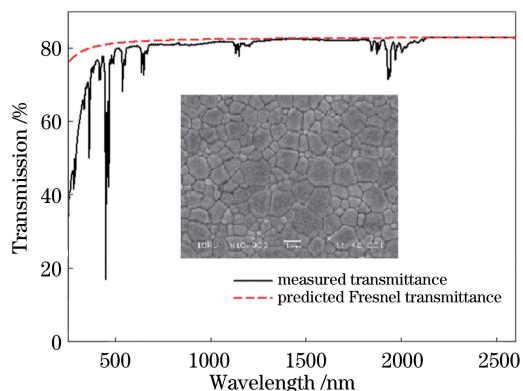


图 5 Ho:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的透过率曲线及 SEM 图像<sup>[26]</sup>  
Fig. 5 Transmittance and SEM image of Ho:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramic<sup>[26]</sup>

### 3.3 基于陶瓷制备优势的 3 μm 激光技术

目前,制备 3 μm 波段激光主要有三种方式:非线性频率转换、半导体激光技术和离子掺杂型激光器。利用掺 Er 的透明陶瓷制备 3 μm 波段激光属于最后一种方法,该方法是一种直接高效获得中红外激光的方法。

3 μm 波段 Er:YAG 激光获得了广泛的应用,目前已有成熟的产品用于医疗领域。但是,由于 YAG 基质的声子能量较大(857 cm<sup>-1</sup>),Er:YAG 能级间的无辐射跃迁几率高,上下能级的寿命差距大(低掺 Er:YAG 的上下能级的寿命比约为 1:50),因此,要在 YAG 中实现 3 μm 激光发射,需要提高钇离子的掺杂浓度。离子之间的能量传递上转换过程(ETU)可以缩短上下能级的寿命差,但过高的掺杂浓度会导致过高的热密度,进而激光输出功率难以提高。

在掺钇的倍半氧化物材料中,5%~7%的低掺杂浓度(原子数分数)就已经能够获得非常理想的 3 μm 波段激光输出。2010 年,美国陆军实验室在 Er:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光器中获得了 2.71 μm 波段的 380 mW 激光输出<sup>[28]</sup>。2011 年,研究者在液氮冷却条件下,将输出功率提升至 14 W<sup>[29]</sup>。2018 年,日本大阪大学利用 Er:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷(Er 的原子数分数为 11%)获得了 2.8 μm、2.3 W 的激光<sup>[30]</sup>。2019 年,研究者利用被动调 Q 手段获得了 9.4 μJ、247 ns 的脉冲激光输出<sup>[31]</sup>。2018 年,厦门大学在被动调 Q 的 Er:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光器中获得了平均功率为 233 mW 的脉冲激光输出,单脉冲能量为 7.92 μJ<sup>[32]</sup>。同年,上海交通大学在 Er:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光器中获得了 2.07 W 的连续波激光输出<sup>[33]</sup>。江

苏师范大学课题组基于自制的高质量倍半氧化物样品,在 3  $\mu\text{m}$  倍半氧化物陶瓷激光制备方面开展了一系列研究工作<sup>[34-36]</sup>,在室温条件下用 976 nm 半导体激光器泵浦 Er:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷介质,在 2.7  $\mu\text{m}$  处获得了 3.8 W 的激光输出,激光斜效率为 14.4%<sup>[36]</sup>。在钪倍半氧化物材料中,掺杂浓度的大幅降低有利于激光系统的热管理,从这个角度讲,利用掺钪的倍半氧化物激光器直接获得百瓦甚至千瓦 3  $\mu\text{m}$  激光输出是有可能的。

### 3.4 复合结构陶瓷激光技术

烧结工艺制备的陶瓷材料容易被制备成各种复合结构。Ikesue 等<sup>[37-38]</sup>在 Nd:YAG 陶瓷(Nd 的原子数分数为 1%)两端各连接了一段未掺杂的 YAG 陶瓷<sup>[37]</sup>,这种复合结构有利于减轻陶瓷端面的热效应,两端未掺杂的 YAG 具有较高的热导率,起到热

沉的作用,有利于激光系统的热管理。研究者采用流延工艺(tape casting process)制造了一种复合陶瓷棒,并获得了 2 W 的激光输出,激光斜效率为 25%<sup>[39]</sup>。2017 年,中国工程物理研究院和江苏师范大学等单位合作开展了复合陶瓷激光技术研究,利用 YAG/Nd:YAG/YAG 复合陶瓷获得了 7.08 kW 的激光输出<sup>[40]</sup>。

图 6 展示了一些已经得到应用的激光陶瓷的复合结构,包括多层结构、芯包结构、平面波导结构及梯度掺杂结构等,如图 6(a)~(e)所示。图 6(f)~(h)分别是圆柱形芯包结构陶瓷的实物图、结构示意图和芯层掺杂浓度的分布曲线<sup>[38]</sup>。利用陶瓷制备工艺获得的陶瓷复合结构,其粒子的掺杂浓度呈近高斯分布。通过控制激活离子在芯层中的掺杂分布,可以达到控制激光输出模式的目的。

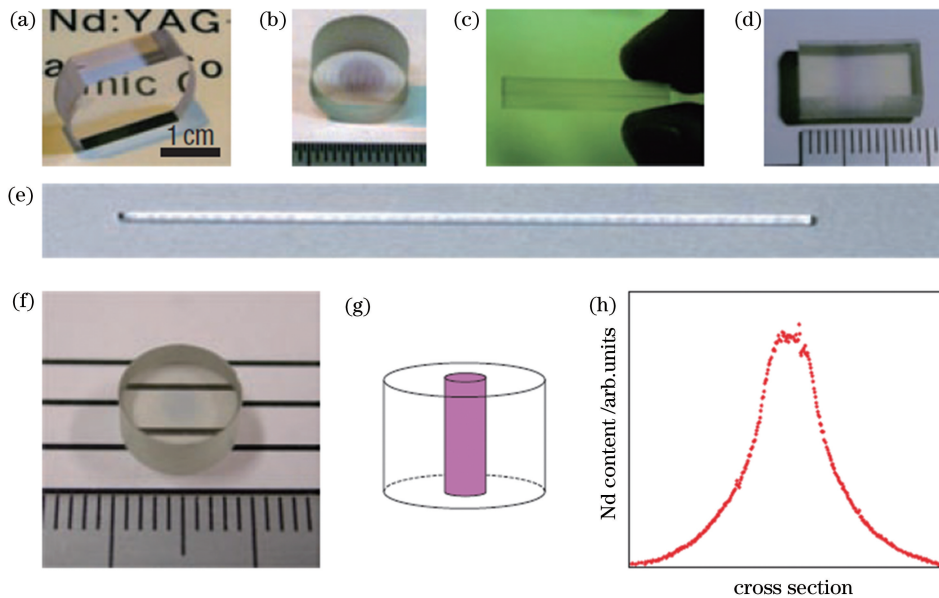


图 6 透明陶瓷结构及芯包复合结构陶瓷<sup>[38]</sup>。(a)层状、(b)圆柱体、(c)平面波导、(d)梯度掺杂和(e)芯包结构透明陶瓷;圆柱形芯包复合结构陶瓷的(f)实物照片、(g)结构示意图和(h)掺杂浓度分布曲线

Fig. 6 Transparent ceramic structures and ceramic with cladding-core composite structure<sup>[38]</sup>. Transparent ceramic structures such as (a) layer, (b) cylindrical, (c) waveguide, (d) gradient, and (e) fiber cladding-core; (f) photo, (g) structural diagram, and (h) doping concentration profile of ceramic with cylindrical cladding-core composite structure

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)在 SSHCL 系统中采用复合结构陶瓷来抑制放大的自发辐射效应(ASE)。在 Nd:YAG 陶瓷片的四周烧结 Sm:YAG 陶瓷片以作为边缘包层(图 7),采用边缘泵浦方式,Sm:YAG 边缘包层不吸收泵浦光,有利于减轻波前畸变,该复合陶瓷有效抑制了 ASE,获得了 67 kW 的激光功率输出,并有效提高了光束质量。复合陶瓷技术不仅有利于激光系统的热管

理,还可以简化激光系统结构。通过陶瓷结构优化设计,可以实现以往需要额外元器件才能实现的激光输出性能控制。

## 4 结束语

自 20 世纪 60 年代陶瓷首次作为激光增益介质以来,透明陶瓷已被广泛应用于激光技术的各个领域,取得了令人瞩目的成就。在高功率、大能量激光

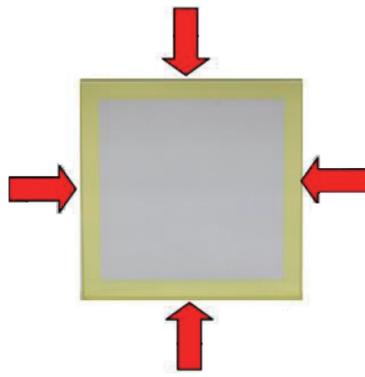


图 7 SSHCL 系统中的复合结构陶瓷示意图

Fig. 7 Diagram of ceramic with composite structure in SSHCL system

输出领域,需要通过不断增大增益介质口径和优化热管理来提高输出功率水平。透明陶瓷材料易于被制备成各种大尺寸复合结构,是一种优秀的激光增益介质。作为一种新型激光增益介质,透明陶瓷材料仍面临很多挑战。从性能角度讲,需要不断提升陶瓷的物理机械性能和光学性能,特别是大尺寸激光增益材料的均匀性;从应用角度讲,陶瓷材料面临批量生产工艺的稳定性和成本控制问题,有些陶瓷材料存在光致暗化(色心)现象。

回顾了透明陶瓷激光的发展历程,总结了透明陶瓷在高功率、超短超强脉冲激光输出和特殊波长激光输出方面的最新进展,阐述了基于陶瓷制备优势的新型激光材料的发展趋势。陶瓷区别于单晶的制备优势使其在激光技术领域大有可为。陶瓷材料作为激光增益介质也使得激光系统设计方面具有更大的自由度和更广阔的发挥空间。

### 参 考 文 献

[1] Maiman T. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1960, 187(4736): 493-494.

[2] Coble R L. Sintering alumina: effect of atmospheres[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1962, 45(3): 123-127.

[3] Hatch S E, Parsons W F, Weagley R J. Hot-pressed polycrystalline  $\text{CaF}_2:\text{Dy}^{2+}$  laser[J]. Applied Physics Letters, 1964, 5(8): 153-154.

[4] Yamamoto R M, Bhachu B S, Cutter K P, et al. The use of large transparent ceramics in a high powered, diode pumped solid state laser[C]//Advanced Solid-State Photonics, January 27-30, 2008, Nara, Japan. Washington, D.C.: OSA, 2008: WC5.

[5] Global Security. Joint high power solid-state laser (JHPSSL) [EB/OL]. [2020-06-15]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/jhpssl.htm>.

[6] Mandl A, Klimek D E. Textron's J-HPSSL 100 kW ThinZag © laser program[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2010, May 16-21, 2010, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2010: JThH2.

[7] Greskovich C, Chernoch J P. Polycrystalline ceramic lasers[J]. Journal of Applied Physics, 1973, 44(10): 4599-4606.

[8] Ikesue A, Kinoshita T, Kamata K, et al. Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid-state lasers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1995, 78(4): 1033-1040.

[9] Lu J R, Ueda K I, Yagi H, et al. Neodymium doped yttrium aluminum garnet ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) nanocrystalline ceramics: a new generation of solid state laser and optical materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 341(1/2): 220-225.

[10] Latham W P, Lobad A, Newell T C, et al. 6.5 kW, Yb:YAG ceramic thin disk laser[J]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1278(1): 758-764.

[11] Ikesue A, Aung Y L, Taira T, et al. Progress in ceramic lasers[J]. Annual Review of Materials Research, 2006, 36(1): 397-429.

[12] Tokurakawa M, Shirakawa A, Ueda K, et al. Diode-pumped ultrashort-pulse generation based on  $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  and  $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramic multi-gain-media oscillator[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3353-3361.

[13] Lim H H, Taira T. High peak power Nd:YAG/Cr:YAG ceramic microchip laser with unstable resonator[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31307-31315.

[14] Mason P, Divoky M, Ertel K, et al. Kilowatt average power 100 J-level diode pumped solid state laser[J]. Optica, 2017, 4(4): 438.

[15] Albach D, Chanteloup J C. Large size crystalline vs co-sintered ceramic  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  disk performance in diode pumped amplifiers[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 570.

[16] Gaumé R, Viana B, Vivien D, et al. A simple model for the prediction of thermal conductivity in pure and doped insulating crystals[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(7): 1355-1357.

[17] Fornasiero L, Mix E, Peters V, et al. New oxide crystals for solid state lasers[J]. Crystal Research and Technology, 1999, 34(2): 255-260.

[18] Wang J, Zhao Y G, Yin D L, et al. Holmium doped yttria transparent ceramics for 2- $\mu\text{m}$  solid state lasers[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(4): 1986-1989.

- [19] Tokurakawa M, Takaichi K, Shirakawa A, et al. Diode-pumped mode-locked  $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$  ceramic laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(26): 12832.
- [20] Tokurakawa M, Shirakawa A, Ueda K, et al. Diode-pumped sub-100 fs Kerr-lens mode-locked  $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  ceramic laser [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(23): 3382-3384.
- [21] Kitajima S, Shirakawa A, Yagi H, et al. Sub-100 fs pulse generation from a Kerr-lens mode-locked  $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$  ceramic thin-disk laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5451.
- [22] Wang Y C, Jing W, Loiko P, et al. Sub-10 optical-cycle passively mode-locked  $\text{Tm}:(\text{Lu}_{2/3}\text{Sc}_{1/3})_2\text{O}_3$  ceramic laser at 2  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10299.
- [23] Sanghera J, Frantz J, Kim W, et al. 10%  $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$  ceramic laser with 74% efficiency [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(4): 576.
- [24] Kitajima S, Nakao H, Shirakawa A, et al. CW performance and temperature observation of  $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$  ceramic thin-disk laser [C]// *Advanced Solid State Lasers 2017*, October 1-5, 2017, Nagoya, Aichi, Japan. Washington, D. C.: OSA, 2017: JM5A.32.
- [25] Wang H, Huang H T, Liu P, et al. Diode-pumped continuous-wave and Q-switched  $\text{Tm}:\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramic laser around 2050 nm [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(2): 296.
- [26] Wang F, Tang J W, Li E H, et al.  $\text{Ho}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramic laser generated over 113 W of output power at 2117 nm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5933.
- [27] Li E H, Tang J W, Shen Y J, et al. High peak power acousto-optically Q-switched  $\text{Ho}:\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramic laser at 2117 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(8): 492-495.
- [28] Sanamyan T, Simmons J, Dubinskii M.  $\text{Er}^{3+}$ -doped  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramic laser at  $\sim 2.7 \mu\text{m}$  with direct diode pumping of the upper laser level [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(3): 206-209.
- [29] Sanamyan T, Kanskar M, Xiao Y, et al. High power diode-pumped 27- $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$  laser with nearly quantum defect-limited efficiency [J]. *Optics Express*, 2011, 19(S5): A1082.
- [30] Uehara H, Tokita S, Kawanaka J, et al. Optimization of laser emission at 2.8  $\mu\text{m}$  by  $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$  ceramics [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3497.
- [31] Uehara H, Tokita S, Kawanaka J, et al. A passively Q-switched compact  $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$  ceramics laser at 2.8  $\mu\text{m}$  with a graphene saturable absorber [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(2): 022002.
- [32] Guan X F, Wang J W, Zhang Y Z, et al. Self-Q-switched and wavelength-tunable tungsten disulfide-based passively Q-switched  $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramic lasers [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 830.
- [33] Qin Z P, Xie G Q, Zhang J, et al. Continuous-wave and passively Q-switched  $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramic laser at 2.7  $\mu\text{m}$  [J]. *International Journal of Optics*, 2018: 3153614.
- [34] Ren X J, Wang Y, Fan X L, et al. High-peak-power acousto-optically Q-switched  $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramic laser at  $\sim 2.7 \mu\text{m}$  [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1-6.
- [35] Wang L, Huang H, Shen D, et al. Room temperature continuous-wave laser performance of LD pumped  $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$  and  $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramic at 2.7  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19495-19503.
- [36] Li E H. Research on sesquioxide-based ceramic lasers at mid-infrared band [D]. Shanghai: Fudan University, 2020: 55-58.  
李恩昊. 基于倍半氧化物基质的中红外波段陶瓷激光技术研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2020: 55-58.
- [37] Ikesue A, Aung Y L. Synthesis and performance of advanced ceramic lasers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(6): 1936-1944.
- [38] Ikesue A, Aung Y L. Ceramic laser materials [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2: 721-727.
- [39] Sanghera J, Kim W, Villalobos G, et al. Ceramic laser material: past and present [J]. *Optical Materials*, 2013, 35(4): 693-699.
- [40] Li M, Hu H, Gao Q S, et al. A 7.08-kW YAG/Nd:YAG/YAG composite ceramic slab laser with dual concentration doping [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1-10.